

Gyűjtőpontok számának meghatározása gravitációs modell alkalmazásával autonóm járműves mobilitási szolgáltatáshoz

Kulcsár Máté¹ – Dr. Földes Dávid² – Nagy Simon³

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar,
Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszék

¹telefon: +36 1 463 1977
e-mail: kulcsar.mate23@gmail.com

²telefon: +36 1 463 1977
e-mail: foldes.david@kjk.bme.hu

³telefon: +36 1 463 1929
e-mail: nagy.simon@kjk.bme.hu

Kivonat: Az autonóm közúti járművek várhatóan elősegítik a keresletalapú mobilitási szolgáltatások elterjedését az ingázó utazások esetén is. Kutatásunk során megosztott autonóm járműves mobilitási szolgáltatáshoz gyűjtő-, elosztóállomás darabszámát meghatározó módszert dolgoztunk ki. A szolgáltatás során az egyéni használatú mikro járművek mozgása „egyedül” egy szakaszon úgy, hogy a járművek az útvonaluk közös szakaszán egy tréleres gyűjtőjárművön utaznak. A közös szakaszt megelőzően a gyűjtőállomáson „felszállnak” a trélerre, majd az elosztóállomáson „leszállnak” a trélerről és a végpontig önállóan közlekednek. A gyűjtőpontoszám meghatározó módszer alapja a gravitációs modell; figyelembe vett tényezők: területi jellemzők és utazási szokásjellemzők (pl.: utazási távolság, közforgalmú közlekedés jelenléte, lakosságszám, munkalehetőségek, váltási hajlandóság). A módszert esettanulmányként a budapesti agglomerációban alkalmaztuk. Megállapítottuk, hogy a tizenegyezer lakosú, nagy kapacitású kötöttpályás közforgalmú közlekedéssel rendelkező Budakeszi kiszolgálásához 23 db gyűjtőpont szükséges. Az eredmények hozzájárulnak az autonóm járműves mobilitási szolgáltatások bevezetéséhez.

Kulcsszavak: autonóm jármű, ingázó forgalom, gyűjtőpont meghatározás, gravitációs modell

Nomenklatúra

i, j	város index
x, y	körzet index
$A_{xy}; A_{ij}$	kapcsolati intenzitás
$m_i; m_j$	foglalkoztatottak, diákok, lakosság száma (tömeg)
$n_i; n_j$	körzetek lakosságszáma [fő]
$r_{ij}; r_{xy}$	távolság [km]
$\tau_{ij}; \tau_{xy}$	időszorzó
γ_{ij}	közösségi közlekedési erősség
α_{xy}	nagykapacitású közösségi közlekedési erősség
β_{xy}	kiskapacitású közösségi közlekedési erősség
b	elérhetőség
$E_{ij}; E_{xy}$	kereslet mértéke
$G'; G''$	gravitációs állandó
h	motorizációs fok [jármű/1000 lakos]
p	gyűjtőpontok csúcscapacitása [kiszolgált mikrojármű/óra]
q	az egyéni gépjárműhasználók váltási hajlandósága [%]
t_j	a j . város lakosságszáma [lakos/1000]
k	S mátrix oszlopai
l	S mátrix sorai
S_j	j . városra szükséges gyűjtőpont darabszám
c	körzetek száma
σ_x	az x . körzetre szükséges gyűjtőpont darabszám

Bevezetés

A nagy városok vonzáskörzetéből naponta érkező ingázó forgalom kezelése, az egyéni gépjárműközlekedésből adódó negatív externáliák (környezetterhelés [1-3], torlódások [4-5], idővesztés [6], területhasználat) mérséklése megoldandó probléma. Nagy kapacitású közforgalmú közlekedési hálózat hiányában a közúti forgalom terhelése még jelentősebb. Alternatív megoldásként egyre népszerűbbek a megosztott mobilitási szolgáltatások (pl. telekocsi). Ugyanakkor számos utazó az egyéni gépjárműhasználatból elérhető rugalmasságot és „kényelmet” nem hajlandó feladni.

Az autonóm járművek fejlesztése a mobilitási szolgáltatások változásához vezet [7]. A szakirodalom többnyire a városi szolgáltatásokkal foglalkozik [8-9], az autonóm járművek városkörnyéki és regionális alkalmazhatóságával kevésbé. Kutatásunk során elővárosi relációban használható autonóm járműves mobilitási szolgáltatás gyűjtőpont darabszámát meghatározó gravitáció modellen alapuló tervezési módszert dolgoztunk ki. A szolgáltatás során az egyéni használatú mikro járművek mozgása „egyesül” egy szakaszon úgy, hogy a járművek az útvonaluk közös szakaszán egy tréleres gyűjtőjárművön utaznak. A közös szakaszt megelőzően a gyűjtőállomáson „felszállnak” a trélerre, majd az elosztóállomáson „leszállnak” a trélerrel. Az átszállási és rágyaloglási kényszer megszűnik, míg az egyéni utazás kényelme megmarad.

A cikk felépítése a következő: az 1. fejezetben áttekintjük a releváns irodalmak eredményeit. A 2. fejezetben bemutatjuk a mobilitási szolgáltatás főbb jellemzőit. A 3. fejezetben részletezzük a gyűjtőpont darabszám meghatározó módszert. A módszer példaterületen történő alkalmazását, a főbb megállapításokat a 4. fejezetben foglaljuk össze. Végezetül a kutatás során levont következtetéseket és a továbbfejlesztés irányait foglaljuk össze.

1. Irodalomkutatás

A mobilitási mintázatok elemzésével alakítható ki az optimális közlekedési hálózat, meghatározható például a töltőállomások [10-11] vagy az autóbusz megállóhelyek [12] száma. A kutatások során számos megközelítést alkalmaztak: honnan-hová mátrixok [13], genetikus algoritmus [14], térinformatika [15-16], gráfelmélet [17]. Az 1. táblázatban meglévő mobilitási mintázatok elemzésével foglalkozó kutatásokat hasonlítottunk össze a kutatások célja, a használt módszer és az egyediségük alapján. Az utolsó sorban a jelen kutatás során kidolgozott módszert is feltüntettük.

Gravitációs modelleket, mint térbeli interakciós modellek csoportját, széles körben alkalmazzák közlekedési rendszerek elemzéséhez. A gravitációs modellekkel is i és j területegységek közötti kölcsönhatás vizsgálható [18]. Két fő csoport különböztethető meg: (i) az áramlás irányát figyelembe vevő, honnan-hová mátrixokat alkalmazó modellek [19-20], valamint (ii) a Newton-féle gravitációs törvényen alapuló, irányfüggetlen, kölcsönhatás-orientált modellek. Utóbbiak a két hely tömegéből (pl. lakosságszám) és a közöttük lévő távolságból indulnak ki [21-22], ezzel becsülve a két terület közötti forgalom nagyságát [23]. A modell kiegészíthető alkalmazás-specifikus tényezőkkel részletesebben leírja az utazók motivációját [24], a meglévő infrastruktúrát vagy a mobilitási szolgáltatást [25]. Jelen kutatásban, mivel a forgalomiránya nem befolyásolja a gyűjtőpontok számát, a Newton-féle gravitációs törvényen alapuló modellt alkalmazzuk.

A napi ingázás során az utazók módválasztását leginkább a biztonság, míg legkevésbé az okozott környezetterhelés befolyásolja [26]. A különböző pénzügyi változások (pl. üzemanyagár, közösségi közlekedés díja) sincsenek számottevő hatással a gépjárműről közösségi közlekedésre történő váltási hajlandóságra. Leginkább érzelmi tényezők döntenek [27]. Az egyéni gépjárműves közlekedés egyik rugalmas alternatívája a telekocsi (ride-sharing). Jelen kutatás középpontjában álló autonóm járműves mobilitási szolgáltatás számos hasonlóságot mutat a telekocsi szolgáltatással (pl. utazók összegyűjtése). A telekocsi szolgáltatások számos szempont alapján elemezhetők: felhasználói viselkedés [28], árképzési modellek [29], fenntarthatósági kérdések [30], szolgáltatástervezés [31]. A megosztott járműhasználat befolyásolja az utazási és tulajdonlási szokásokat, ami további pozitív környezeti hatásokkal jár, például torlódás- és az károsanyag-csökkenés [32-33]. Az autonóm járművek megosztott használatában nagy potenciál rejlik. Az autonóm járművek használatával az üzemeltetési hatékonyság és szolgáltatások rugalmassága fokozható [34], a közös járműhasználat ösztönözhető [35].

1. táblázat: Mobilitási mintázatokat elemző módszerek összehasonlítása

	Megközelítés	Cél	Használt módszer	Egyediség
[13]	Városi közlekedési hálózatok értékelése és optimalizálása	Személyszállítási rendszerek, hálózat felügyelete és optimalizálás fokozása	Utazó-útvonal összerendelő algoritmus	Honnan-hová mátrix, szakaszok és csomópontok, várakozási idő elemzés
[14]	Utas-jármű összerendelés és jármű újraosztás keresletalapú mobilitási szolgáltatáshoz	Összerendelési feladat megoldása historikus adatokon alapuló becslés alapján	Neurális háló – historikus adat alapú tanulás	Historikus utazási profilok, historikus és valós idejű igények, újraosztás előrejelzése
[15]	Mobilitási minták - kerékpár-alapú közlekedési rendszer elemzése	Felhasználók elégedettség fokozása	Térbeli és időbeli adatok, gyakoriság értékek (hétköznapi, óránként), térbeli mobilitási minták	Idősor-elemzés
[16]	Kerékpármegosztó rendszerek gyűjtőállomásainak optimális helyszínei: térinformatikai megközelítés	Térinformatikai alapú módszer fejlesztése	Térbeli és infrastruktúra adatok; potenciális igények meghatározása, változatelemzés, állomáskapacitás elemzés	GIS, potenciális kereslet modellezése, térbeli adatok használata
[17]	Mobilitási minták elemzése a mobilitás szolgáltatás javítása érdekében	városi mobilitás javítása - folyamatos információcsere, újszerű forgalom-irányítás alkalmazása	Úthálózat ábrázolása, útállapot-csoportosítás, torlódás előrejelzése, hőtérképek alkalmazása	Gráfelmélet, forgalomszimuláció
-	Gravitációs modellen alapuló megközelítésünk	Gyűjtőpontok számának meghatározása innovatív mobilitási szolgáltatáshoz	Newton-féle gravitációs modell	Nincs honnan-hová mátrix, demográfiai és infrastrukturális adatok felhasználása

Az irodalomkutatás alapján megállapítottuk, hogy az autonóm járműves mobilitási szolgáltatások intenzíven kutatott terület, ugyanakkor azok gyakorlati tervezését, például a gyűjtőhelyek kijelölése a kevésbé kutatott területek között van. A gravitációs modellekkel becsülhető a városok, körzetek közötti kapcsolati intenzitás, ami alkalmas a kereslet, így a gyűjtőpontok számának becslésére; legjobb tudomásunk szerint a modellt még nem alkalmazták gyűjtőpontok, megállóhelyek számának meghatározására. A modellezés előnye, hogy új tényezők vezethetők be, amik az alapvető számítási logikát nem befolyásolják; ugyanakkor az eddig alkalmazások többnyire közlekedési (pl. menetrend) és demográfiai (pl. lakosság szám, alkalmazottak száma) jellemzőket vettek csak figyelembe.

2. Autonóm járműves mobilitási szolgáltatás

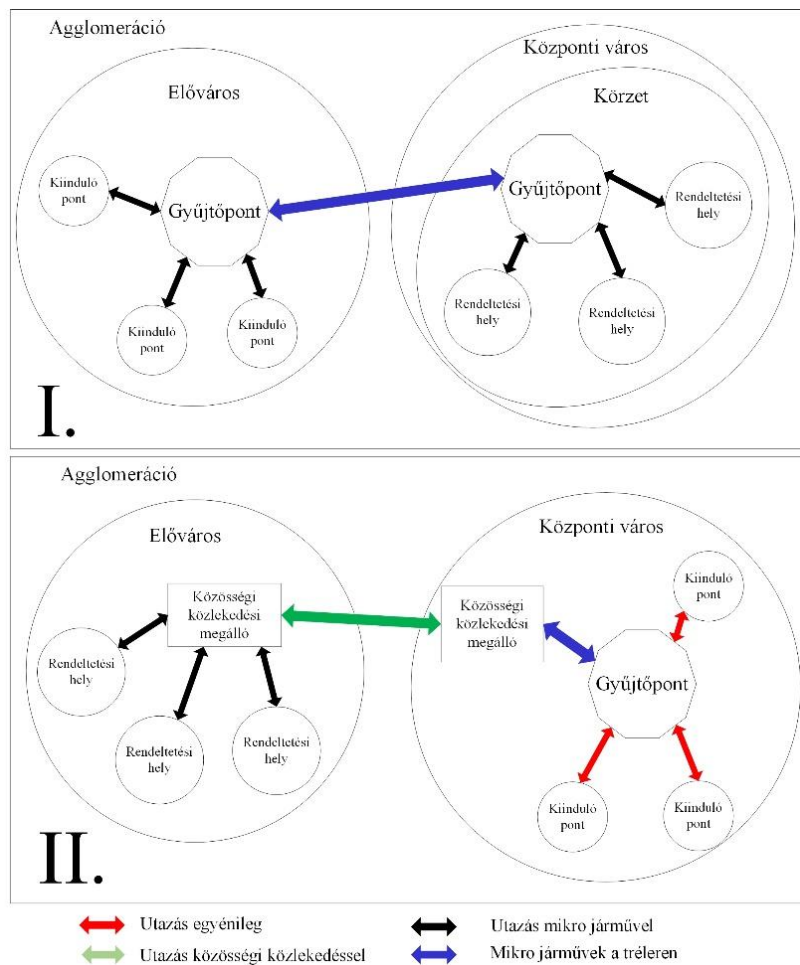
Az angol mozaikszóval rövidített autonóm járműves mobilitási szolgáltatás (TCAV – Trailer-based Collected Autonomous Vehicle – Trélerrel gyűjtött autonóm járműves szolgáltatás) célja alternatíva biztosítása az egyéni gépjárműves ingázó forgalom számára. A TCAV háztól-házig nyújt átszállásmentes, az első és utolsó kilométereket, valamint a városok közötti utazást ötvöző, gyűjtő-elosztó jellegű szolgáltatást. Adott település különböző részeiből érkező mikro járművek egy gyűjtőponton „felszállnak” egy trélerre; az úticéljukhoz közeli elosztóponton „leszállnak” a trélerrel, ahonnan önállóan teszik meg az utolsó kilométereket.

A rendszer összetevői:

- mikro jármű: 2 férőhelyes, kisméretű, alacsony hatótávolságú önvezető jármű; az utazó, vagy a mobilitási szolgáltató tulajdona (megosztott járműhasználat); ráhordó/elosztó funkció,
- tréler: 3-5 mikro járművet szállítani képes önvezető jármű; a szolgáltató társaság tulajdona.

Szolgáltatástípusok:

- Városközi, háztól-házig: a tréler városok között szállít (1. ábra felső része).
- Kombinált, ráhordó: a tréler az agglomeráción belül a legközelebbi nagykapacitású tömegközlekedési megállóig (pl. vasútállomás) hord rá. A mikro járművek a jelenlegi P+R rendszerhez hasonlóan a vasútállomáson parkolnak (1. ábra alsó része), vagy megosztott járműhasználat esetén új utast szolgáltatnak ki.



1. ábra: A mobilitási szolgáltatás működése háztól-házig (I.) és kombinált (II.) utazás esetén

A környezetterhelés minimalizálása és a hatékonyságnövelés érdekében a járművek hajtása elektromos. A mikro járművekben kiskapacitású akkumulátor található, amely rövid távolságú utazásra alkalmas (első-, utolsókilométerek). Ezzel szemben a trélerben egy nagykapacitású akkumulátor található. A tréleres szállítással az összesített energiafelhasználás várhatóan alacsonyabb, mintha a mikro járművek önállóan közlekednének. További előny, hogy a tréleres szállítás kevésbé helyigényes, szemben a mikro járműves önálló közlekedésével, ezzel a forgalomlefordítás javítható. A mobilitási szolgáltatás ember vezette járművekkel is megvalósítható, ugyanakkor a hatékonyság autonóm járművekkel fokozható üzemeltetési (fel-, leszállás a trélerre/tréleréről) és felhasználói oldalról (egyéni utazás lehetősége a vezetési és férőhelymegosztási kényszer nélkül).

A 2. táblázatban a jelenlegi közlekedési módokat hasonlítottuk össze a TCAV szolgáltatással. A pontok száma az adott szempont meglétének erősségét fejezi ki.

2. táblázat: Közlekedési módok összehasonlítása

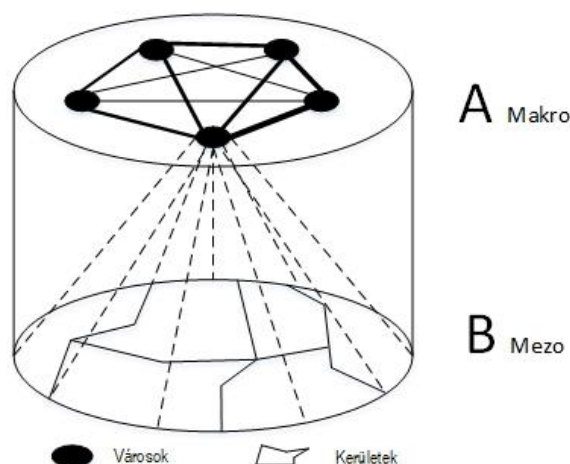
		A	B	C	D
	Szemponatok	Egyéni gépjárműves közlekedés	Menetrend- szerinti közforgalmú közlekedés	Telekocsi	TCAV
a	Háztól-házig	•••••	•	•••	•••••
b	Keresletalapú	•••••	•	•••	•••••
c	Fajlagos energiafelhasználás	•	•••••	••	••••
d	Rugalmasság	•••••	•	•••	••••
e	Individualitás	•••••	•	••	••••
f	Forgalmi előnyök	•	•••••	•	•••
g	Átlagos férőhely kihasználás	••	•••••	••	•••

A TCAV az utazót a célállomásig szállítja, nincsen szükség átszállásra (a), más utazóval egy légtérben történő utazásra (e). A gyűjtő-elosztó szolgáltatás keresletalapú, rugalmas, míg a közösségi közlekedés menetrend szerinti közlekedése miatt kevésbé rugalmas (b, d). Ugyanakkor a közösségi közlekedés előnyben részesítése jellemző, mely előnyben részesítés akár a TCAV szolgáltatás számára is elérhető a tréleres szállítási fázisban (f). A gyűjtő-elosztó jellegű szolgáltatás utaskapacitása kisebb, egy mikro jármű két személyes, tehát egy tréleren maximum 12 ember utazhat (g). Az autonóm járműves mobilitási szolgáltatás fajlagos energiafelhasználása a tréleres szállítás miatt alacsony (c).

A TCAV szolgáltatás használatához minden esetben előzetes igénybejelentés szükséges a hatékony kapacitás és igény összerendelés érdekében. Ösztönzendő a több órával az utazást megelőző rendelés, illetve utazási időintervallum megadása. Az egyidejűleg fellépő, hasonló úticélú utazási igények összerendelésével alakítható ki egy-egy tréleres szállítás. A mikro járművek nem feltétlenül a kiindulási ponthoz legközelebbi gyűjtőpontot szállnak fel a trélerre. A TCAV szolgáltatás üzemeltetése során cél az üres futást minimalizálása. A fizetés közvetlenül az utazás után történhet.

3. Módszertan

Újszerű, a Newton-féle gravitációs modellen alapuló gyűjtőpontszám meghatározó módszert dolgoztunk ki. Modelllezési szintek: (A) makro szint a városok elemzésére, (B) mezo szint adott városban a körzetek elemzésére (2. ábra). Egy harmadik, ún. mikro szint is megkülönböztethető a gyűjtőpontok közvetlen helyszínének meghatározására; a jelenlegi kutatás során ennek kidolgozása nem célunk.



2. ábra: Az elemzési szintek

A gravitációs modell általánosan i és j területegységek közötti kapcsolat intenzitásának (A_{ij}) kifejezésére használható (1). Az intenzitás kifejezésére ún. tömeg és távolság változók alkalmazandók. Az általánosan alkalmazandó gravitációs modellbe új tényezőket vezettünk be.

$$A_{ij} = g\zeta \frac{m_i m_j}{\theta r^2} \quad (1)$$

ahol:

- m tömeg,
- r távolság,
- g gravitációs állandó,
- ζ, θ tényezők, ahol ζ egyenesen arányos, míg a θ fordítottan arányos az intenzitásértékkel.

Makro szinten és mezo szinten gravitációs modellt dolgoztunk ki. Az eredményül kapott intenzitás értékek a TCAV szolgáltatás szükségességét fejezik ki adott relációban. Az intenzitás értékéből következtethető a gyűjtőpontok szükséges száma. Abból a feltételezésből indultunk ki, hogy a vonzásérték és a szükséges gyűjtőpontok száma között összefüggés van. Tömegértékeknek a munkavállalók és diákok, valamint a lakosok számát tekintettük, mint az ingázó forgalmat, így a keresletet leginkább kifejező jellemzők. A menetrendszerinti közösségi közlekedést jellemző új tényezőket vezettünk be; makro szinten a megállóhelyek és gerinchálózatok megléte, míg mezo szinten a városon belüli kapcsolatokat leírva. Feltételeztük, hogy a közforgalmú közlekedéssel ellátott területeken a TCAV szolgáltatás léte kevésbé indokolt, így kevesebb gyűjtőpont elhelyezése szükséges. A változók értékeinek beállítása a helyi viszonyok ismeretében lehetséges.

3.1 Makro szint

A két város közötti becsült kölcsönhatást az (2) egyenlet írja le.

$$A_{ij} = G' \cdot E_{ij} \cdot Y_{ij} \cdot \frac{m_i \cdot m_j}{\tau_{ij} \cdot r_{ij}^2} \quad (2)$$

ahol:

- A_{ij} kapcsolati intenzitás i és j város között,
- m_i, m_j i és j városban a foglalkoztatottak és diákok száma ($m_i = n_{fogl.,i} + n_{diák,i}$) [fő],
- r_{ij} legrövidebb közúti távolság i és j városok középpontja között, $r_{ij} \in \mathbb{N}^+$,
- τ_{ij} idősorzó tényező, kifejezi i és j város közötti jellemző utazási időt; értéke függ a jellemző közúti torlódás nagyságától (fordítottan arányos). 1-nél magasabb érték esetén az utazás általában lassabban tehető meg, mint az elméleti utazási idő $\tau \in [1,$
- E_{ij} kereslet mértéke tényező i és j város között: leírja i és j város közötti egyéb kereslet mértékét; értéke függ a szabadidős (pl.: színház, mozi, zöldterület) és egyéb létesítmények (pl.: egészségügy, közigazgatás) számától és méretétől (egyenesen arányos). $E_{ij} \in]0,5..1,5[, 0,5$; ha nincs egyéb kereslet; 1,5; ha az egyéb kereslet mértéke nagy.
- G' módosított gravitációs állandó makro szinten, $G' = 0,1 \cdot 10^{-5}$,
- Y_{ij} közösségi közlekedési erőssége: kifejezi az i és j város közötti közösségi közlekedés jelenlétét (egyenesen arányos). $Y_{ij} \in]0,5..1,5[, 1,5$, ha gyenge; 0,5, ha erős a közösségi közlekedési kapcsolat.

Az i és j város közötti kapcsolati intenzitás értékek kategorizálhatók a maximum kapcsolati intenzitás A_{ij}^{max} arányában. A szükséges gyűjtőpontok számát a kapcsolati intenzitás mellett alapvetően befolyásolja a szolgáltatás iránti kereslet nagysága és a gyűjtőpontok csúcsidei kapacitása. A várható kereslet nagyságát a járműszám és az egyéni gépjárművet használók TCAV szolgáltatásra történő váltási hajlandóságának függvényében határoztuk meg. A gyűjtőpontok darabszáma az \underline{S} mátrix alapján határozható meg (3). Az érték a motorizációs fok és kapcsolati intenzitás függvényében változik: $(k + 1) - k = 200$, $(l + 1) - l = 50$.

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} \frac{h_{11} t_j q}{p} & \dots & \frac{h_{1l} t_j q}{p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{h_{k1} t_j q}{p} & \dots & \frac{h_{kl} t_j q}{p} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ahol:

- S_j : a j városban szükséges gyűjtőpontok darabszáma,

- k : a mátrix sora,
 l : a mátrix oszlopai,
 t_j : a j város lakosságszáma/1000,
 h : motorizációs fok [jármű/1000 lakos],
 p : gyűjtőpontok csúcsórai kapacitása [kiszolgált mikro jármű/óra],
 q : az egyéni gépjárműhasználók váltási hajlandósága [%].

A mátrix alkalmazását paraméteresen a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat: Gyűjtőpontok darabszáma vonzásérték kategóriák és a motorizációs fok függvényében

vonzásérték kategóriák	Motorizációs fok [jármű/1000 lakos]				
	0-200	201-400	401-600	601-800	801-1000
$0 A_{ij}^{max} - 0,2 A_{ij}^{max}$	$\frac{0 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{200 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{400 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{600 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{800 \cdot t_j \cdot q}{p}$
$0,2 A_{ij}^{max} - 0,4 A_{ij}^{max}$	$\frac{50 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{250 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{450 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{650 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{850 \cdot t_j \cdot q}{p}$
$0,4 A_{ij}^{max} - 0,6 A_{ij}^{max}$	$\frac{100 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{300 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{500 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{700 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{900 \cdot t_j \cdot q}{p}$
$0,6 A_{ij}^{max} - 0,8 A_{ij}^{max}$	$\frac{150 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{350 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{550 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{750 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{950 \cdot t_j \cdot q}{p}$
$0,8 A_{ij}^{max} - A_{ij}^{max}$	$\frac{200 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{400 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{600 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{800 \cdot t_j \cdot q}{p}$	$\frac{1000 \cdot t_j \cdot q}{p}$

3.2 Mezo szint

A j város körzetei közötti kapcsolati intenzitás a (4) egyenlet alkalmazásával számítható. A körzetek kijelölhetők adminisztratív egységek (pl.: kerület, városrész) szerint vagy a terület egyenlő méretű, homogén egységekre való bontásával. Amennyiben hivatalos területi egységek nem állnak rendelkezésre, vagy a vizsgálat nagyobb felbontást igényel természeti, infrastrukturális vagy funkcionális határok mentén is körzetekre bontható a város.

$$A_{xy} = G'' \cdot E_{xy} \cdot \alpha_{xy} \cdot \beta_{xy} \frac{m_x \cdot m_y}{\tau_{xy} \cdot r_{xy}^b} \quad (4)$$

ahol:

- A_{xy} kapcsolati intenzitás x és y körzet között,
 m_x, m_y x és y városrész tömege, vagyis a körzetek lakosságszáma [fő],
 b elérhetőség [-]: körzetek elérhetőségét, azok központi, vagy periférikus fekvését jellemző érték [36]: $b \in [1,5..2,5]$, 1,5, ha jellemzően más körzetekbe, 2,5, ha jellemzően más települések irányába történnek az utazások,
 G'' módosított gravitációs állandó mezo szinten, $G'' = 0,1 \cdot 10^{-2}$,
 α nagykapacitású közösségi közlekedés erőssége; kifejezi a körzetek közötti járatsűrűséget (egyenesen arányos). $\alpha \in]0,5..1,5[$, 1,5; ha a követési idő >30 perc, 0,5; ha <10 perc,
 β kiskapacitású közösségi közlekedés erőssége; kifejezi a körzetek közötti járatsűrűséget (egyenesen arányos). $\alpha \in]0,5..1,5[$, 1,5; ha a követési idő >20 perc, 0,5; ha <5 perc.

Adott körzetre vonatkoztatott kapcsolati intenzitás értékek átlagolásával megadható a körzetre jellemző vonzás (5).

$$\sum_{y \in z} f(y) = A_x \quad (5)$$

ahol:

$$f(y) = \frac{A_{xy}}{c - 1}$$

- z a körzeteket tartalmazó halmaz, amely a vizsgálandó körzetet nem tartalmazza; $z = \{1, 2 \dots \infty\} \setminus x$,

- x a vizsgálandó körzet; $x = \{1, 2 \dots \infty\}$,
 y a viszonyított körzet, a vizsgált körzet,
 c körzetek darabszáma.

A körzetekre kiszámolt A_x vonzásértékek alapján arányosan oszthatók szét a körzetekben a gyűjtőpontok. Az x . körzetekre szükséges gyűjtőpontok darabszáma (S_x) az (6) egyenlet alapján határozható meg.

$$S_x = \frac{A_x}{\sum_{x=1}^c A_x} \cdot S_j \quad (6)$$

4. Esettanulmány

A módszer validálása és az alkalmazhatósága érdekében alkalmaztuk módszert Budakalász településre, mint esettanulmány. A település a fővárosi agglomeráció része, a budapesti ingázó forgalom jelentős. A település kötöttpályás közösségi közlekedési kapcsolattal rendelkezik (H5 HÉV). Ugyanakkor, van direkt budapesti közösségi közlekedési kapcsolattal nem rendelkező településrésze is. A bemeneti adatok forrása: KSH és egyéb statisztikai adatbázisok, nyílthozzáférésű térképes alkalmazások.

4.1 Makro szint

Definiáltuk a változók és tényezők értékét Budakalász és kapcsolataira vonatkozóan (4.táblázat). A táblázat utolsó oszlopában a kapcsolati intenzitás számított értéke olvasható. Budakalászon a foglalkoztatottak, diákok száma (m_i) 4000 körülire tehető.

4. táblázat: Változók értéke és a számított kapcsolati intenzitás városok között (kivonat)

i	m_i [fő]	r_{ij} [km]	τ_{ij}	E_{ij}	Y_{ij}	A_{ij}
Dunakeszi	16000	12,4	1,2	1	1,5	0,5203
Szentendre	9000	8,7	1	0,8	0,5	0,1902
Békásmegyer	14500	3,5	1	1	0,5	2,3673
Göd	16000	22,5	1	1	1,5	0,1896
Veresegyháza	8200	26,3	1	0,8	1,5	0,0569
Örbottyán	3500	28,7	1	0,7	1,5	0,0178
Fót	8200	14,6	1,2	0,8	1,5	0,1539
Budapest	680000	17	1,2	1,5	0,5	5,8823
Pilisborosjenő, Üröm	4200	4,7	1,2	0,7	1,5	0,6655
Solymár	4100	13,4	1,2	0,7	1,3	0,0693
...

A kiszámolt kölcsönhatás alapján is megállapítható Budapest méretéből és jelentőségéből adódó nagy vonzó hatása. A legnagyobb kapcsolati intenzitás Budapest - Budakalász között adódott ($A_{ij} = 5,88$), ez alapján A_{ij}^{max} értéke 5,88.

A gyűjtőpont darabszám meghatározáshoz szükséges további változók értéke:

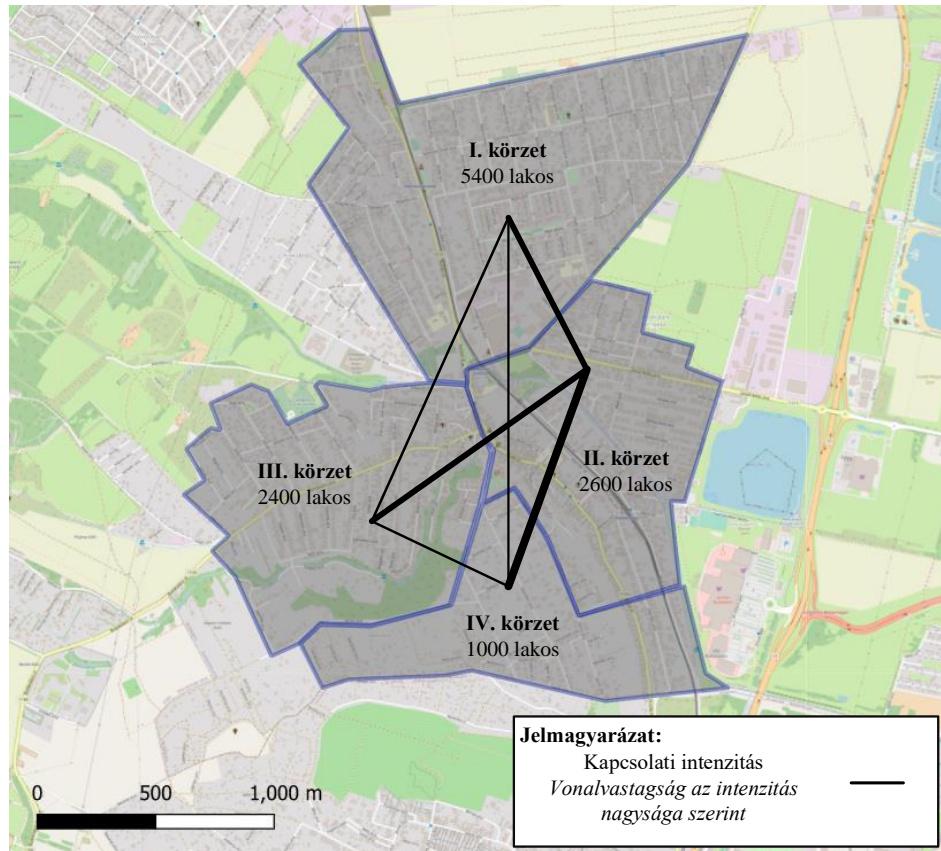
- q feltételeztük, hogy az egyéni gépjárműhasználók 5%-a váltana; $q = 0,05$,
 p feltételeztük, hogy egy gyűjtőpont maximálisan 15 járművet képes kiszolgálni csúcsidőben; $p=15$,
 m Budapest agglomerációjában jellemző motorizációs fok; $m=406$ jármű/1000 lakos.

Budakalászon a szükséges gyűjtőpontok darabszáma $S_j = 23$.

4.2 Mezo szint

Körzeteket határoztunk meg a lakosságszám és területi jellemzők (főutak elválasztó hatása, természeti határok – parkok) alapján (3. ábra). Csak lakófunkciójú területeket soroltunk be. Az ábrán a körzetek közötti vonalvastagság a kapcsolat intenzitás erősségét fejezi ki.

A körzetek között definiált változók értékét a 5. táblázat tartalmazza. A táblázat utolsó oszlopában a számított kapcsolat intenzitás értéke olvasható. A körzetek lakosság száma: $n_I = 5400$ fő, $n_{II} = 2600$ fő, $n_{III} = 2400$ fő, $n_{IV} = 1000$ fő. α_{xy} magas azon körzetek között, ahol lehetséges HÉV-vel utazni, közepes, ahol a HÉV csak a körzet szélén áll meg, és alacsony, ahol nincs HÉV megálló. β_{xy} értéke magas, mivel nincs kiskapacitású közösségi közlekedés városon belül.



3. ábra: Budakalász körzetei és a körzetek közötti intenzitás mértéke

5. táblázat: Változók értéke és a számított kapcsolati intenzitás körzetek között

x	y	E_{xy}	α_{xy}	β_{xy}	τ_{yy}	b	A_{xy}
I.	II.	1,2	0,5	1,5	1,2	2,5	0,8274
I.	III.	1	1,2	1,5	1,2	2,5	0,3719
I.	IV.	1	1,5	1,5	1,2	1,5	0,3243
II.	III.	1,2	1,2	1,5	1,2	2,5	0,8510
IV.	III.	1	1,5	1,5	1,2	1,5	0,3589
IV.	II.	1	1,5	1,5	1,2	1,5	1,1547

Az egyes körzetek vonzása és a körzetekben szükséges gyűjtőpontok számát az 6. táblázat tartalmazza. A táblázatban a körzetek méretét is feltüntettük

6. táblázat: Körzetek összesített kapcsolati intenzitása és a szükséges gyűjtőpont száma

x	zónák mérete [km ²]	A_x	σ_x
I.	1,47	0,5078	5
II.	0,53	0,9444	8
III.	0,73	0,5273	5
IV.	0,99	0,6126	5

Bár a II. körzet a legkisebb területű, az összesített kapcsolati intenzitása a legnagyobb, így a körzetben

szükséges gyűjtőpontok száma is a legmagasabb. Ennek oka, hogy a körzet a városközpontjában helyezkedik el, a lakosságszám magas, a többi körzettel a kapcsolati intenzitása jelentős. Ezzel szemben a legnagyobb területű I. körzetben a legkisebb a kapcsolati intenzitás, a szükséges gyűjtőpontok száma a legkevesebb. Ennek oka, hogy a körzet főként kis beépítettségű, a lakosságszám alacsony, a többi körzettel a kapcsolati intenzitása nem számottevő.

Konklúzió

A kutatásunk fő eredménye egy a Newton-féle gravitációs modell-alapú gyűjtőpont-szám meghatározó módszer autonóm járműves mobilitási szolgáltatáshoz. A szolgáltatás során az autonóm mikro járművek a közös szakaszokon, jellemzően városok között, egy tréleren utaznak; fő alkalmazási terület: agglomerációs ingázó forgalom. A gyűjtőpontok száma a gravitációs modellel, a területegységek közötti kapcsolati intenzitás mértékéből határozható meg. Új tényezőket vezettünk be, amelyek jellemzik a városok között és városon belül elérhető közforgalmú közlekedési hálózatot. További figyelembe vett tényezők a váltási hajlandóság, a motorizációs fok, a munkavállalók és diákok száma és a lakosságszám. Két elemzési szintet különböztettünk meg; makro szinten a városok közötti intenzitás, míg mézo szinten a városon belüli körzetek közötti intenzitás határozandó meg. A módszert esettanulmányként alkalmaztuk Budakalászára. Megállapítottuk, hogy a tizenegyezer lakosú, nagy kapacitású kötöttpályás közforgalmú közlekedéssel rendelkező Budakeszi kiszolgálásához 23 db gyűjtőpont szükséges. Kutatás folytatásaként célunk a gravitációs állandó pontosításán keresztül a modell fejlesztése. A módszert alkalmazzuk más városokra is a változók és az állandó értékének pontosabb beállítása érdekében. További cél a modell validálása, a kapott eredmények összehasonlítása más módszerekkel számított eredményekkel.

Köszönetnyilvánítás: EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001: Tehetséggondozás és kutatói utánpótlás fejlesztése autonóm járműirányítási technológiák területén - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. A publikációban szereplő kutatást, amelyet a BME-KJK valósított meg, az Innovációs és Technológiai Minisztérium és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében.

Irodalomjegyzék

- [1] Lee Changyeon: Metropolitan sprawl measurement and its impacts on commuting trips and road emissions, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020/82/102329 <http://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102329>
- [2] Fenner Andriel Evandro - Charles Joseph Kibert – Li Jiaxuan – Razkenari Mohamad Ahmadzade – Hakim Hamed: Embodied, operation, and commuting emissions: A case study comparing the carbon hotspots of an educational building. Journal of Cleaner Production, 2020/268/122081 <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122081>
- [3] Wei Peng - Pan Haixiao: Research on individual carbon dioxide emissions of commuting in peri-urban area of metropolitan cities —an empirical study in Shanghai. Transportation Research Procedia, 2017/25/ 3459-3478 <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.253>
- [4] Wu Wenjie - Wang Mark (Xin) - Zhang Fangni: Commuting behavior and congestion satisfaction: Evidence from Beijing, China. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019/67/ 553-564 <http://doi.org/10.1016/j.trd.2018.12.023>
- [5] Yang Hai - Liu Wei – Wang Xiaolei – Zhang Xiaoning: On the morning commute problem with bottleneck congestion and parking space constraints. Transportation Research Part B: Methodological, 2013/58/106-118 <http://doi.org/10.1016/j.trb.2013.10.003>
- [6] Jun Myung-Jin: Quantifying welfare loss due to longer commute times in Seoul: A two-stage hedonic price approach. In Cities, 2019/84/75-82 <http://doi.org/10.1016/j.cities.2018.07.007>
- [7] Coppola Pierluigi – Silvestri Fulvio: Autonomous Vehicles and Future Mobility, Elsevier, 2019 – 1-15, ISBN 978-0-12-817696-2 <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-817696-2.00001-9>

- [8] Luke Butler - Tan Yigitcanlar - Alexander Paz: Barriers and risks of Mobility-as-a-Service (MaaS) adoption in cities: A systematic review of the literature. In Cities. 2021/109/103036, <http://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103036>
- [9] Łukasz Owczarzak - Jacek Żak: Design of passenger public transportation solutions based on autonomous vehicles and their multiple criteria comparison with traditional forms of passenger transportation. Transportation Research Procedia, 2015/10/472-482, <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.001>
- [10] Vosooghi Reza – Puchinger Jakob – Bischoff Joschka – Jankovic Marija – Vouillon Anthony: Shared autonomous electric vehicle service performance: Assessing the impact of charging infrastructure. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020/81/102283, <http://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102283>
- [11] Wai Chew Kuew – Rong Yong Yew – Morris Stella: Simulation of a distance estimator for battery electric vehicle, Alexandria Engineering Journal, 2015/54/359-371, <http://doi.org/10.1016/j.aej.2015.04.008>
- [12] Shatnawi Nawras - Al-Omari Aslam A. - Al-Qudah Haya: Optimization of Bus Stops Locations Using GIS Techniques and Artificial Intelligence. Procedia Manufacturing, 2020/44/52-59., <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.204>
- [13] Mandl Christoph E.: Evaluation and optimization of urban public transportation networks, European Journal of Operational Research, 1980/5/396-404, [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(80\)90126-5](http://doi.org/10.1016/0377-2217(80)90126-5)
- [14] Lei Zengxiang – Qian Xinwu – Ukkusuri Satish V.: Efficient proactive vehicle relocation for on-demand mobility service with recurrent neural networks, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020/117/102678, <http://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102678>
- [15] Kaltenbrunner Andreas – Meza Rodrigo – Grivolla Jens – Codina Joan – Banchs Rafael: Urban cycles and mobility patterns: Exploring and predicting trends in a bicycle-based public transport system, Pervasive and Mobile Computing, 2010/6/455-466, <http://doi.org/10.1016/j.pmcj.2010.07.002>
- [16] García-Palomares Juan Carlos – Gutiérrez Javier – Latorre Marta: Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach, Applied Geography, 2012/35/235-246, <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.07.002>
- [17] Akabane Ademar T. – Gomes Rafael L. – Pazzi Richard W. – Madeira Edmundo R. M. – Villas Leandro A.: APOLO: A Mobility Pattern Analysis Approach to Improve Urban Mobility, GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference, 2017/1-6 <http://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8253942>
- [18] C. A. Thompson. – Saxberg K. – Lega J. – Tong D. – Brown H. E.: A cumulative gravity model for inter-urban spatial interaction at different scales. Journal of Transport Geography, 2019/79/102461 <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102461>
- [19] John Q. Stewart.: Demographic Gravitation: Evidence and Applications. In. Sociometry. 1948/11/31-58. <http://doi.org/10.2307/2785468>
- [20] O. Z. Tamin - L. G. Willumsen.: Transport demand model estimation from traffic counts. Transportation, 1989/16/3-26 <http://doi.org/10.1007/BF00223044>
- [21] A. G. Wilson.: A Family of Spatial Interaction Models, and Associated Developments. Environment and Planning A: Economy and Space, 1971/3/1-32. <http://doi.org/10.1068/a030001>
- [22] Steven Yamarik. - Sucharita Ghosh. (2005) A Sensitivity Analysis of the Gravity Model. The International Trade Journal 19 pp. 83-126 DOI: <http://doi.org/10.1080/08853900590905784>
- [23] Hong Inho - Jung Woo-Sung : Application of gravity model on the Korean urban bus network. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016/462/48-55 <http://doi.org/10.1016/j.physa.2016.06.055>
- [24] Reul Julian – Grube Thomas – Stolten Detlef: Urban transportation at an inflection point: An analysis of potential influencing factors. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021/92/102733 <http://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102733>
- [25] S. Nagy - Cs. Csiszár.: Analysis of Ride-sharing based on Newton's gravity model, 2020 Smart City Symposium Prague (SCSP), 2020/1-6. <http://doi.org/10.1109/SCSP49987.2020.9133971>

- [26] Mayo Francis L. - Taboada Evelyn B.: Ranking factors affecting public transport mode choice of commuters in an urban city of a developing country using analytic hierarchy process: The case of Metro Cebu, Philippines. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2020/4/100078, <http://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100078>
- [27] Anna Urbanek: Potential of modal shift from private cars to public transport: A survey on the commuters' attitudes and willingness to switch – A case study of Silesia Province, Poland. *Research in Transportation Economics*, 2020/101008 <http://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.101008>
- [28] Pranav Shah – Varghese Varun – Jana Arnab – Mathew Tom: Analysing the ride sharing behaviour in ICT based cab services: A case of Mumbai, India. *Transportation Research Procedia*, 2020/48/233-246, <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.018>
- [29] Yan Pengyu – Lee Chung-Yee – Chu Chengbin – Chen Cynthia – Luo Zhiqin: Matching and pricing in ride-sharing: Optimality, stability, and financial sustainability. *Omega*, 2021/102351, <http://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102351>
- [30] Alejandro Tirachini – Chaniotakis Emmanouil – Abouelela Mohamed – Antoniou Constantinos: The sustainability of shared mobility: Can a platform for shared rides reduce motorized traffic in cities?. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020/117/102707. <http://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102707>
- [31] Jiangping Zhou.: Ride-sharing service planning based on smartcard data: An exploratory study. *Transport Policy*, 2019/79/1-10, <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.04.009>
- [32] Amatuni Levon – Ottelin Juudit, Steubing Bernhard, Mogollón José M. :Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2020/266/121869 <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121869>
- [33] Caulfield Brian: Estimating the environmental benefits of ride-sharing: A case study of Dublin. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009/14/527-531 <http://doi.org/10.1016/j.trd.2009.07.008>
- [34] Hyland Michael, Mahmassani Hani S.: Operational benefits and challenges of shared-ride automated mobility-on-demand services. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020/134/251-270, <http://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.017>
- [35] Zhao Yan – Guo Xiaolei – Liu Henry X.: The impact of autonomous vehicles on commute ride-sharing with uncertain work end time. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021/143/221-248, <http://doi.org/10.1016/j.trb.2020.11.002>
- [36] Gábor Nagy: A gravitációs modell alkalmazási lehetőségei a településen belüli mozgások tanulmányozására. *Tér és Társadalom*, 1996/10/149-156, <http://doi.org/10.17649/TET.10.2-3.374>